

УДК 621.01

В. Н. СТРЕЛЬНИКОВ, М. Г. СУКОВ

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ В САД-СИСТЕМАХ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ПРОГРАММЫ К СТАНКАМ С ЧПУ

Разработана методика, позволяющая оптимизировать геометрические параметры сопряженных элементов зубчатого и червячного зацепления высших кинематических пар, на уровне математической модели. В пределах основного закона зацепления корректировать главные кривизны активных поверхностей, удовлетворяя оптимальным условиям образования гидродинамического масляного клина, минимизации энергетических потерь и износа зубьев, максимальной несущей способности по контактным нагрузкам. Широкие позитивные возможности математического моделирования приобретает в условиях нарезки зубьев крупных зубчатых и червячных колес на универсальных станках с ЧПУ, принципиальным образом отличающейся от методов копирования и обкатки, где поверхности зубьев формируются не только на основе геометрического моделирования, но и жесткой инструментально – станочной кинематики, определяющей самостоятельное направление при формообразовании поверхностей зубьев. Свобода относительно станочной модуляции формируемых поверхностей зубьев, при их нарезании на универсальных станках с ЧПУ, обеспечивает возможность оптимизации фактически основных параметров зубчатого и червячного зацепления. Метод такой оптимизации поверхностей зубьев и представляет основное содержание работы.

Ключевые слова: червяк, колесо, симуляция, математическая модель заготовка, червячное зацепление, поверхность зуба.

В. М. СТРЕЛЬНИКОВ, М. Г. СУКОВ

ТРИВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ЗУБІВ В CAD-СИСТЕМАХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПРОГРАМ ДО ВЕРСТАТІВ ІЗ ЧПУ

Розроблено методологію, яка дозволяє оптимізувати геометричних параметрів зв'язані елементи передач і черв'ячних передач вище кінематичних пар, на рівні математичної моделі. В рамках основного закону готується скоригована основного викривлення активних поверхонь для задоволення освітніх оптимальні умови гідродинамічних нафти клин, звести до мінімуму втрати енергії і зносу зубів, максимальна перевізника можливість зв'язатися з навантаженнями. Широкі позитивні можливості з точки зору математичного моделювання різання зубів великих передач і черв'ячних коліс на універсальні з ЧПУ принципової манера відрізняється від методів копіювання і працює, де поверхня зубів формуються не тільки на основі геометричних моделювання, але щільно інструментальні оптимальної кінематики, визначення незалежних напрямків у формуванні поверхонь зубів. Свободи щодо оптимального модуляції породжених поверхні зуба, коли вони різання на універсальний верстат з ЧПУ, дозволяє реальному оптимізації основних параметрів передач і черв'ячних передач. Цей метод оптимізації поверхонь зубів і є основний зміст роботи.

Ключові слова: черв'як, колесо, моделювання, математична модель, черв'ячна передача, поверхня зуба.

V. N. STRELNIKOV, M. G. SUKOV

THREE-DIMENSIONAL MODELLING OF SURFACES OF TEETH IN CAD SYSTEMS TO GENERATE PROGRAMS TO MACHINE TOOLS WITH CAD

A methodology that allows to optimize the geometrical parameters of conjugate elements gear and worm gear higher kinematic pairs, at the level of mathematical model. Within the Basic Law gearing adjusted principal curvature active surfaces to meet the optimal educational conditions of hydrodynamic oil wedge, minimizing energy loss and wear of the teeth, the maximum carrier ability to contact loads. Broad positive opportunities in terms of mathematical modeling of cutting teeth of large gears and worm wheels on universal CNC principled manner different from methods of copying and running, where the surface the teeth are formed not only on the basis of the geometric modeling, but tight instrumental-optimal kinematics, defining an independent direction in shaping the surfaces of the teeth. Freedom regarding the optimal modulations generated by surfaces of teeth, when they are cutting on universal CNC machines, enables actual optimization of basic parameters of gear and worm gear. This optimization method of the surfaces of the teeth and is the main content of the work.

Keywords: worm wheel, simulation, mathematical model, harvesting, worm gear tooth surface.

Актуальность проблемы. Среди требований, предъявляемых к продукции тяжелого машиностроения, на первый план выходят качество, новые потребительские свойства, конкурентоспособность, себестоимость и ликвидность. Для реализации приведенных требований необходима концентрация научных и технологических методов на разработке и производстве передовых промышленных изделий. Одной из важнейших составляющих тяжелого машиностроения являются механический привод и трансмиссии, основой которых служат передачи зацеплением.

Совершенствование передач зацеплением методом оптимизации параметров [1], основанном на передовых достижениях теории зубчатых зацеплений [2, 3], результатов компьютерного моделирования, использования современного технологического оборудования, является актуальной задачей тяжелого машиностроения.

Цель работы. Разработать метод многофакторного синтеза сопряженных поверхностей зубьев свободный от взаимоогибания, на основе симуляции зубчатого зацепления в CAD-системах для трехмерного моделирова-

ния и оптимизации активных поверхностей зубьев по критериям контактной нагрузки, образования масляного клина, минимизации износа и энергетических потерь.

Основная часть. Сформировались два основных принципиально различных способа нарезания зубьев – по методу копирования и обкатки. Метод копирования реализуется на универсальных фрезерных станках дисковыми или пальцевыми фрезами, рабочий контур которых профилируется таким образом, чтобы он в полной мере соответствовал форме поверхностей производимых зубьев. Точность единичного деления нарезаемых зубьев определяется точностью делительной головки станка.

Методом обкатки зубья нарезаются на зубострогальных станках – инструментальной рейкой, на зубодолбежных станках – долбяком, на зубофрезерных станках – червячной фрезой. Метод обкатки характеризуется более высокой производительностью и точностью изготовления зубчатых колес. Наибольшей производительностью обладает процесс зубофрезерования зубьев червячной фрезой, хотя он не располагает высокой точностью.

© В. Н. Стрельников, М. Г. Суков, 2018

Инструментальное производство, в особенности червячных фрез, является очень трудоемким и дорогостоящим производством – технологическим процессом. Фасонные дисковые и пальцевые фрезы изготавливаются в индивидуальном порядке не только по соответствующим модулям, но и по числу нарезаемых зубьев на заготовке колеса.

Для производства конических зубчатых колес существует отдельный станочный парк.

Основной проблемой при использовании универсальных станков или обрабатывающих центров с ЧПУ для обработки зубчатого зацепления является создание достоверной математической модели впадины зуба для последующей ее обработки.

Для описания достаточно сложной криволинейной поверхности зуба требуется мощный математический аппарат. Задача усложняется тем, что в процессе зацепления участвуют минимум два элемента, то есть объем вычислений многократно увеличивается. Незначительные ошибки в геометрии хотя бы одного элемента обязательно вызовут снижение прочностных характеристик зубчатого зацепления, а в общем случае приведет к интерференции зубьев, не позволяющей осуществлять функционирование зубчатой или червячной передачи.

Упростить процесс синтеза зубчатого зацепления для последующей генерации программы для станков с ЧПУ, избежать ошибок, позволяет процесс симуляции формирования поверхностей зубьев или симуляции зубчатого зацепления в CAD-системах для трехмерного моделирования (рис. 1–6).

Формообразование впадины зуба на заготовке осуществляется путем симуляции технологического процесса зубонарезания инструментом или геометрии зацепления сопрягаемых деталей в CAD-системе. Описание этого процесса производим на примере червячной пары, обладающей следующими характеристиками:

- модуль $m = 38$ мм;
- число зубьев червячного колеса $z_k = 49$;
- сопрягаемый червяк – архимедов;
- число заходов червяка $z_q = 3$;
- межосевое расстояние $a_w = 1100$ мм.

В паре червяк – червячное колесо более простой деталью является червяк, зуб которого фактически образуется профилем зубчатой рейки, вытянутым вдоль винтовой линии. Поэтому в данном случае мы создаем модель червяка: на заготовке червяка строим профиль и условно выдавливаем его (рис. 1).

Чтобы получить трехзаходный червяк, выполняется операция размножения полученного витка вдоль оси червяка и это позволяет получить готовую модель червяка (рис. 2).

Вторым элементом симуляции является заготовка червячного колеса, которая получается путем вращения сечения, относительно оси.

Следующей операцией мы устанавливаем червяк и заготовку червячного колеса в рабочее положение, то есть оси тел лежат в одной плоскости, скрещиваются под прямым углом и величина нормали между ними равна межосевому расстоянию (рис. 3).

Затем выполняется Булева операция изъятия общего материала из заготовки колеса, поворачиваем червяк и заготовку колеса на соответствующие величины углов φ и φ/U соответственно относительно собственных осей, где φ – шаг нарезки (подбирается экспериментально), U – передаточное отношение.

Повторяем операцию изъятия общего материала.

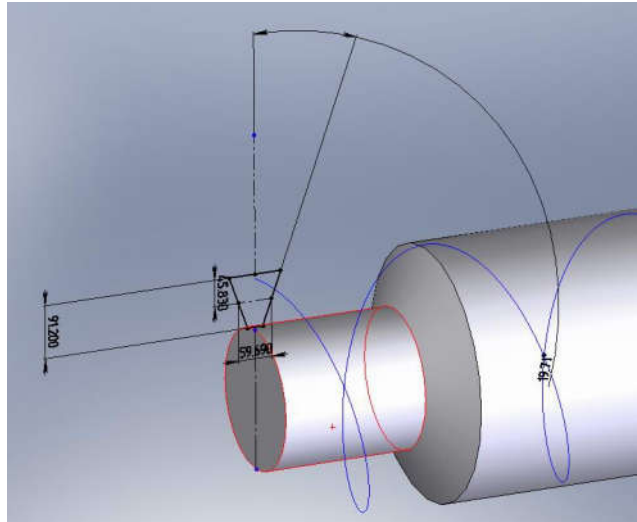


Рис. 1 – Построение винтовой линии и профиля зуба червяка

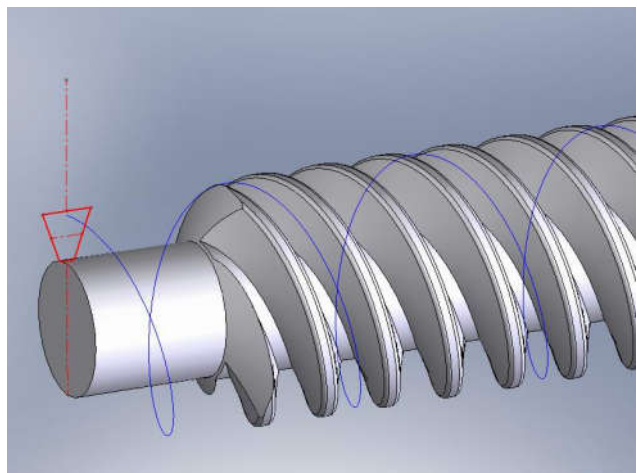


Рис. 2 – Готовая модель червяка

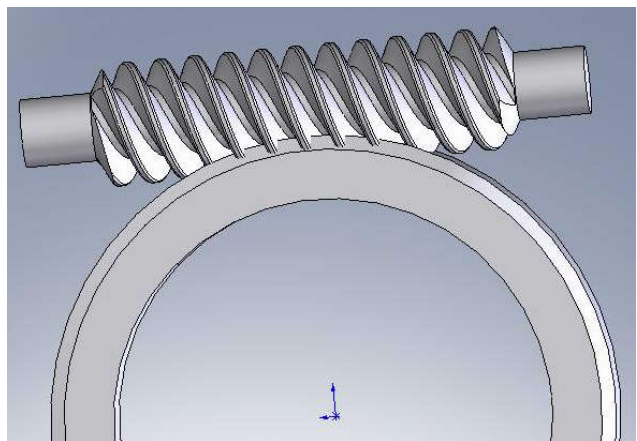


Рис. 3 – Модели червяка и заготовки червячного колеса в рабочем положении

Неоднократное повторение этой операции необходимое число раз n позволяет в результате получить на заготовке червячного колеса заданный профиль зуба (рис. 4).

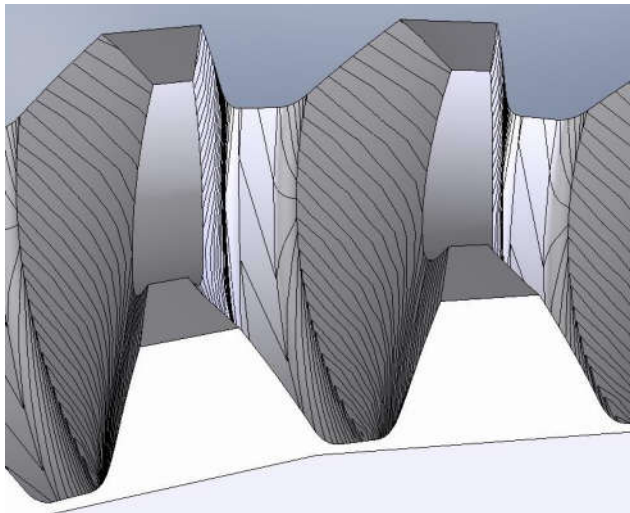


Рис. 4 – Впадина зуба на модели червячного колеса

При моделировании поверхностей зубьев выполняется текущий контроль профиля модели по высоте зуба и параметрам сопряжения (рис. 5). В соответствии с полученными контрольными цифрами, корректируются размеры математической модели зуба, а также проверяются необходимые условия существования непрерывности и качественных характеристик зубчатого зацепления [4, 5].

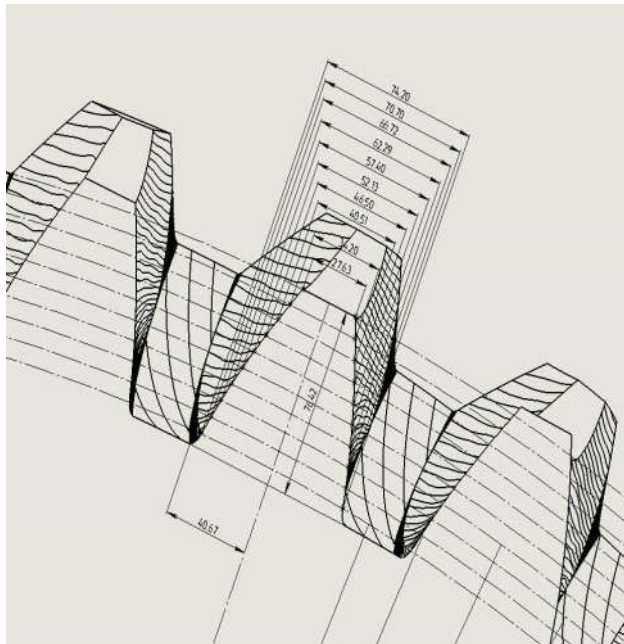


Рис. 5 – Проверка размеров профиля зуба по высотам

Полученная модель червячного колеса передается в САЕ-систему для генерации управляющей программы для станка с ЧПУ (рис. 6). Готовая программа передается на универсальный станок с ЧПУ, где в соответствии с разработанной математической моделью и реализуется процесс механической обработки червячного колеса (рис. 7).

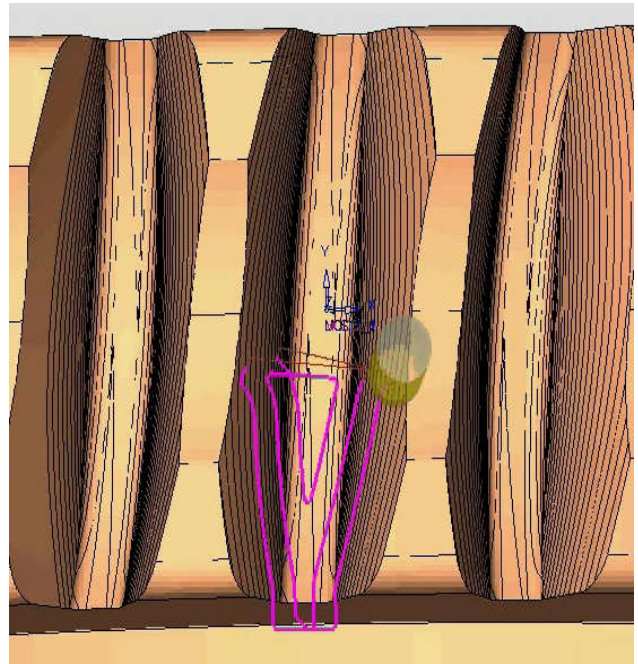


Рис. 6 – Генерация программы обработки впадины зуба



Рис. 7 – Обработка червячного колеса на станке с ЧПУ TOS VARNSDORF

На рис. 8 показана нарезка зубьев червячного колеса резцом – летучкой. На рис. 9–13 представлено производство различных зубчатых колес на универсальных обрабатывающих центрах с ЧПУ.



Рис. 8 – Нарезка зубьев червячного колеса резцом – легучкой



Рис. 9 – Обработка прямозубой шестерни на станке с ЧПУ TOS VARNSDORF



Рис. 10 – Обработка четверти косозубого колеса на станке с ЧПУ TOS KURIM



Рис. 11 – Обработка шевронной шестерни на станке с ЧПУ TOS VARNSDORF



Рис. 12 – Нарезка круговых зубьев на конической шестерне на станке с ЧПУ FERRARI



Рис. 13 – Коническая шестерня с круговыми зубьями, нарезанными на станке с ЧПУ FERRARI

При разработке математических моделей сопряженных поверхностей зубьев не планируется моделирование движения обкатки режущего инструмента относительно формируемых зубьев на заготовке. При этом виртуальная модель зубчатого (червячного) зацепления освобождается от негативного влияния технологических факторов. На синтез поверхностей зубьев не оказывают влияние известные технологические ограничения, а также условия взаимоограничения сопряженных поверхностей, что обеспечивает управляемость процесса.

Компьютерное моделирование позволяет оптимизировать зубчатое (червячное) зацепление из условий изгибной и контактной прочности зубьев [6, 4], минимизации износа и энергетических потерь, других требований. Наиболее общие требования, предъявляемые к зубчатому зацеплению обязательные к исполнению – это постоянство передаточного отношения и отсутствие интерференции зубьев. Эти требования обеспечивают условия работоспособности любой передачи и закладываются в процесс компьютерного моделирования сопряженных поверхностей зубьев в качестве необходимых для решения многофакторных задач.

Широкие функциональные возможности переналаживаемых универсальных многокоординатных станков с ЧПУ обеспечивают более высокую точность и чистоту обрабатываемых поверхностей, многократное повышение производительности производства, возможность воспроизведения сложных поверхностей и деталей с минимальными погрешностями. Все виды цилиндрических, конических и червячных колес обрабатываются на ограниченном парке универсальных многокоординатных станков с ЧПУ, с использованием простейшего стандартного режущего инструмента.

Использование универсальных многокоординатных станков с ЧПУ приобретает особую актуальность в условиях тяжелого машиностроения с единичным и мелкосерийным производством, где специализированные зуборезные станки имеют большие простои из-за отсутствия плановой экономики и стабильной номенклатуры выпускаемой продукции. При недостаточном объеме зуборезных работ универсальные многокоординатные станки с ЧПУ эффективно используются для качественной механической обработки других деталей.

Широкие технологические возможности современных обрабатывающих центров значительно повышают съем готовой продукции с единицы производственных площадей, многократно повышают производительность труда, упрощают и снижают стоимость инструментального производства. Обеспечивают возможность производства передач зацеплением с новыми, более высокими техническими характеристиками по нагрузочной способности, чистоте обрабатываемых поверхностей, шумовой мощности, что существенным образом повышает конкурентные преимущества про-

дукции тяжелого машиностроения. В этих условиях стоимость зуборезных работ на универсальных станках с ЧПУ ниже, чем на специализированных зуборезных станках. Поэтому в целях оптимизации производственного процесса, снижения себестоимости и повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции, на ПАО НКМЗ морально устаревшее зуборезное оборудование выведено из производственного процесса.

Выводы. Нарезка зубьев обкатным инструментом вводит технологические ограничения на оптимизацию сопряженных поверхностей зубьев по контактным нагрузкам и условиям смазки, вызывает известные технологические дефекты, ограничивает возможность повышения производительности труда и качества выпускаемой продукции.

Для устранения отмеченных недостатков, упрощения синтеза зубчатого зацепления для последующей генерации программы для универсальных станков с ЧПУ, избегания ошибок путем введения контрольных операций, разработан метод симуляции формирования поверхностей зубьев или симуляции зубчатого зацепления в CAD-системах для трехмерного моделирования.

Список литературы

1. Соболев И. М., Статников Р. Б. *Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями*. Москва: Наука, 1981. 107 с.
2. Litvin F. L. *Gear Geometry and Applied Theory*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994, 724 p.
3. *Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых и червячных передач*. Под ред. И. А. Болотовского. Москва: Машиностроение, 1986. 448 с.
4. Копф И. А. Физическая модель контакта эвольвентного зацепления (задание, износ). *Вестник машиностроения*. 1999, № 8. С. 141–144.
5. Короткин В. И., Газаев Д. А. Моделирование контактного взаимодействия зубьев колес зубчатых передач Новикова. *Вестник машиностроения*. 2014, № 11. С. 31–35.
6. Устиненко В. Л. *Напряженное состояние зубьев цилиндрических прямозубых колес*. Москва: Машиностроение, 1972. 92 с.

References (transliterated)

1. Sobol I. M. Statnikov R. B. *Vybor optimal'nykh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami* [Choice of optimal parameters in tasks with many criteria]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 107 p.
2. Litvin F. L. *Gear Geometry and Applied Theory*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994, 724 p.
3. *Spravochnik po geometricheskomu raschetu jevol'ventnykh zubchatykh i chervyachnykh peredach* [The geometric reference jevolventnykh calculation of gear and worm gear]. Edited I. A. Bolotovskij. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 1986. 448 p.
4. Kopf I. A. Fizicheskaja model' kontakta evol'ventnogo zaceplenija (zaedanie, iznos) [Physical model of contact of the involute gearing (sticking, wear)]. *Bulletin of engineering*. 1999. No. 8. Pp. 141–144.
5. Korotkin V. I., Gazaev D. A. Modelirovanie kontaktnogo vzaimodejstviya zub'ev koles zubchatykh peredach Novikova [Modeling of contact interaction of teeth of the gear wheels Novikova]. *Bulletin of engineering*. 2014. No. 11. Pp. 31–35.
6. Ustinenko V. L. *Naprazhennoe sostojanie zub'ev cilindricheskih prjamozubykh koles* [Stress state of teeth of helical spur wheels]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 1972. 92 p.

Поступила (received) 17.06.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Стрельников Виктор Микитович (Стрельников Виктор Никитович, Strelnikov Viktor Nikitovich) – доктор технічних наук (Dr. habil. of Eng. S.), професор, Белгородський державний технологічний університет ім. В. Г. Шухова, професор кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів; м. Белгород, Росія; e-mail: viktor.strelnikov2017@yandex.ru

Суков Максим Геннадійович (Суков Максим Геннадьевич, Sukov Maxim Gennadievich) інженер, Приватне акціонерне товариство "Новокраматорський машинобудівний завод", начальник механічного цеху; м. Краматорськ, Україна; e-mail: maxgs@yandex.ru